

二足歩行ロボットにおける オートバランスとパワーアシストのハイブリッド制御

○ 金岡 克弥 (立命館大学 & マンマシンシナジーエフェクタズ株式会社)

Hybrid Auto-Balance/Power-Assist Control for Bipedal Walking Robots

*Katsuya KANAOKA (Ritsumeikan Univ. & MMSE Inc.)

Abstract—A hybrid auto-balance/power-assist control method for bipedal walking robots is provided in this paper. This method opens up the possibility to the robust bipedal walking on unknown rough terrains without knowing the system dynamics information, utilizing both the flexible and impromptu gait generation skill of human and the autonomous balancing control of robot. This is another implementation of Man-Machine Synergy Effector, the concept of our robotic tool design.

Key Words: Man-Machine Synergy Effector (MMSE), Bipedal Walking Robot, Autonomous Balancing Control, Power-Assist Control, Hybrid Control.

1. はじめに

現在、事前知識を持たない不整地において頑健な歩行を実現する二足歩行ロボットは、筆者の知る限り見当たらない。多くの研究における二足歩行技術は軌道制御ベースであり、現在の二足歩行ロボットの隆盛はこれによってもたらされていると言えよう。しかし一方で、これが不整地歩行を困難とする一因であると筆者は考えている。軌道制御ベースの場合、二足歩行というタスクは軌道計画と軌道制御に分離される。しかし、未知の不整地歩行を前提として考えれば、これは必ずしも適切ではない。

なぜなら、未知の不整地においては原則として事前知識を利用できない。したがって、ダイナミクスの事前知識を要する軌道計画でなく、陽に軌道を計画しない歩行技術が求められる。

さらに軌道制御では、予期せぬ外乱にサーボレベルで対応することはできない。センサで外乱を計測し、軌道計画を補正し、改めて軌道制御する、という手順を踏まなければならない。これらにもダイナミクスの事前知識が必要であり、未知の不整地歩行において外乱に対応した実時間補正を軌道制御ベースで行なうのは現状では困難である。

同様の問題意識から、軌道制御ベースではない手法も提案されている。これらのいくつかは、人間のバランス維持における ankle strategy [1] のロボットへの実装と解釈できる。つまり、足関節トルクを操作量とするバランス維持手法に基づく歩行技術である。

佐野、古荘らは、足関節トルクを操作量、ロボットシステムの角運動量を制御量として二足歩行を実現した [2, 3, 4, 5]。水戸部らも ZMP (直接的には足関節トルク) を操作量とする有用性を主張 [6] し、角運動量を制御量とする手法 [7] を提案している。

しかし、角運動量のフィードバック系を構成するには、関節速度/角速度と全体の角運動量を関係づける慣性項の事前知識がやはり必要である。さらにこれら

の手法では、重力方向が既知であることが暗黙の前提になっており、未知の不整地ではそれらを計測するセンサが必要となる。さらに、ロボットが足以外からも外力を受ける場合には、外力が角運動量に及ぼす影響も陽に知らなければならない。

伊藤らは、足関節トルクを操作量、床反力の差の積分値を制御量とする手法 [8, 9, 10, 11] を提案した。単脚支持期におけるバランス維持が、事前知識を持たない未知のロボットダイナミクス、未知の一定外力下において実現されている。床反力の差 (床反トルク) の積分値は、角運動量と同じ次元の物理量であるが、計測に際して角運動量のような事前知識を必要としないという利点がある。

伊藤らはこの手法を両脚支持期に拡張して、ロボットの重心軌道の接線方向の一般化力を操作量、両足を統合した CoP (Center of Pressure) の誤差の積分値を制御量とする手法 [12, 13] を提案した。

この両足を統合した CoP は、両足が同一平面上に載っていれば、床反力の垂直成分の計測によって導出される。しかし未知の不整地においては両足が同一平面上にあることは期待できず、その場合の CoP をどう定義すべきかについては明らかにされていない。

2. 提案手法の方針

歩行の課題は大きく分けて以下の二つである。

1. 初期状態から目標状態までの歩容計画
2. 転倒せず歩行を継続するためのバランス維持

未知の不整地歩行では、ダイナミクスの事前知識は利用できないことが前提となる。そこで本稿では、課題解決のために以下のようなアプローチをとる。

まず 1. の歩容計画については、自律歩行を諦めて人間の操作 (パワーアシスト) に任せてしまう。これは課題の解決ではなく回避であるが、当面の制御目的をバランス維持に限定することができる。

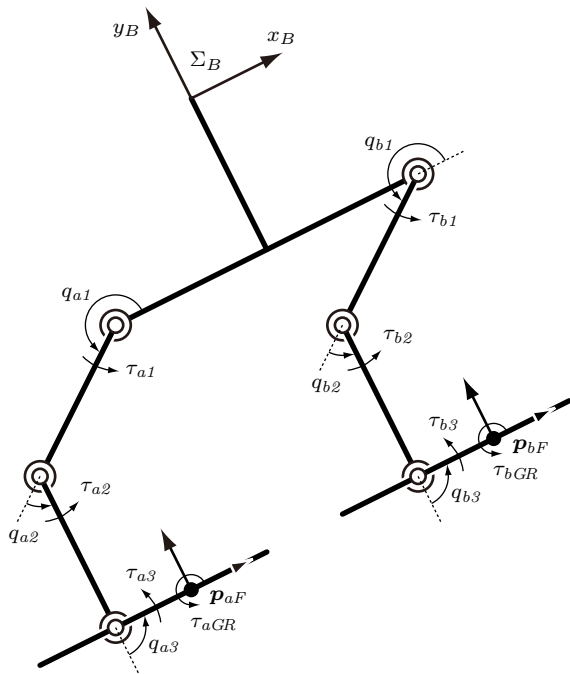


Fig.1 矢状面上での二足歩行ロボット

次に2.のバランス維持を、ロボットダイナミクスの事前知識を用いずに配慮しつつ、軌道制御ベースではなく駆動力（トルク）制御ベースで行なう。すなわち ankle strategy を念頭に置き、足関節トルクを操作量として、人間の操作に頼らず自律的にバランス維持を行なう（オートバランス）。

そして、これらの独立した制御が互いに干渉しないようにハイブリッド制御 [14] の枠組みで統合する。このように、二足歩行ロボットにおけるオートバランスとパワーアシストの両立を実現する。

3. 提案手法

簡単のために、Fig.1 のような矢状面上の二足歩行ロボットの両脚支持期に限定して考察する。\$m\$ を空間自由度とすると三次元空間上では \$m = 6\$ であるが、ここでは \$m = 3\$ となる。ただし本手法は、容易に三次元空間に拡張でき、一般性を失わない。

各脚をそれぞれ脚 \$a, b\$ とし、関節数を \$n_a, n_b\$ とする。ここでは \$n_a = n_b = 3\$ とした。各脚の関節 \$j\$ の変位を \$q_{aj}, q_{bj}\$ とし、駆動トルクを \$\tau_{aj}, \tau_{bj}\$ とする。

3.1 足部制御と脚部制御のハイブリッド化

各脚 \$n_{FC} = 1\$ 個（三次元では \$n_{FC} = 2\$ 個）の足関節アクチュエータを FCA (Foot Control Actuator) とし、その他の \$n_{LC} = n_a + n_b - 2n_{FC} = 4\$ 個のアクチュエータを LCA (Leg Control Actuator) とする。このとき、FCA 変位と LCA 変位の一般化座標ベクトルを以下のように定義する。

$$\mathbf{q}_F = \begin{bmatrix} q_{a3} & q_{b3} \end{bmatrix}^T \in \mathcal{R}^{2n_{FC}} \quad (1)$$

$$\mathbf{q}_L = \begin{bmatrix} q_{a1} & q_{a2} & q_{b1} & q_{b2} \end{bmatrix}^T \in \mathcal{R}^{n_{LC}} \quad (2)$$

同様に、一般化駆動力ベクトルを定義する。

$$\boldsymbol{\tau}_F = \begin{bmatrix} \tau_{a3} & \tau_{b3} \end{bmatrix}^T \in \mathcal{R}^{2n_{FC}} \quad (3)$$

$$\boldsymbol{\tau}_L = \begin{bmatrix} \tau_{a1} & \tau_{a2} & \tau_{b1} & \tau_{b2} \end{bmatrix}^T \in \mathcal{R}^{n_{LC}} \quad (4)$$

まず、幾何学的拘束条件を考える。両脚支持期においては、両脚の全自由度 \$n = n_a + n_b\$ の内、足が地面に固定されていることにより \$m\$ 自由度が拘束されるため、残されている自由度は \$n - m = 3\$ である。この拘束条件は以下のように表現できる。

$$\mathbf{J}_F \dot{\mathbf{q}}_F + \mathbf{J}_L \dot{\mathbf{q}}_L = \mathbf{0} \quad (5)$$

ただし \$\mathbf{J}_F, \mathbf{J}_L\$ はそれぞれ関節速度 \$\dot{\mathbf{q}}_F, \dot{\mathbf{q}}_L\$ の拘束条件を表わすヤコビ行列であり、

$$\mathbf{J}_F(\mathbf{q}_F, \mathbf{q}_L) \in \mathcal{R}^{(n-m) \times 2n_{FC}} \quad (6)$$

$$\mathbf{J}_L(\mathbf{q}_F, \mathbf{q}_L) \in \mathcal{R}^{(n-m) \times n_{LC}} \quad (7)$$

である。この拘束条件下で、\$\mathbf{q}_L\$ を動かすことによって間接的に \$\mathbf{q}_F\$ を動かすことを考えよう。拘束条件 (5) より、

$$\dot{\mathbf{q}}_F = -\mathbf{J}_F^+ \mathbf{J}_L \dot{\mathbf{q}}_L + (\mathbf{I} - \mathbf{J}_F^+ \mathbf{J}_F) \mathbf{k} \quad (8)$$

となる。\$\mathbf{J}_F^+\$ は \$\mathbf{J}_F\$ の疑似逆行列であり、\$\mathbf{k}\$ は任意の定数ベクトルである。一見冗長性があるように見えるが、自由度数に関する考察から \$\mathbf{J}_F^+ \mathbf{J}_F = \mathbf{I}\$ なので実際には冗長性はなく、

$$\dot{\mathbf{q}}_F = -\mathbf{J}_F^+ \mathbf{J}_L \dot{\mathbf{q}}_L = \mathbf{J}_{FL} \dot{\mathbf{q}}_L \quad (9)$$

である。ただし、

$$\mathbf{J}_{FL} = -\mathbf{J}_F^+ \mathbf{J}_L \in \mathcal{R}^{2n_{FC} \times n_{LC}} \quad (10)$$

とした。式 (9) から仮想仕事の原理によって、

$$\boldsymbol{\tau}_L = \mathbf{J}_{FL}^T \boldsymbol{\tau}_F \quad (11)$$

となる。これは両脚支持期の拘束条件 (5) 下で、\$\boldsymbol{\tau}_F\$ と静力学的に等価な \$\boldsymbol{\tau}_L\$ を表わす式となっている。

FCA, LCA への制御指令をそれぞれ \$\boldsymbol{\tau}_{FC}, \boldsymbol{\tau}_{LC}\$ とし、以下のようにハイブリッド化する。

$$\boldsymbol{\tau}_F = \boldsymbol{\tau}_{FC} \quad (12)$$

$$\boldsymbol{\tau}_L = (\mathbf{I} - \mathbf{J}_{FL}^T \mathbf{J}_{FL}^{+T}) \boldsymbol{\tau}_{LC} \quad (13)$$

ただし \$\mathbf{I}\$ は単位行列、\$\mathbf{J}_{FL}^{+T}\$ は \$\mathbf{J}_{FL}^T\$ の疑似逆行列であり、\$(\mathbf{I} - \mathbf{J}_{FL}^T \mathbf{J}_{FL}^{+T})\$ は \$\mathbf{J}_{FL}^T\$ の直交射影行列である。直交射影をとることで、脚部制御 \$\boldsymbol{\tau}_{LC}\$ の内、足部制御 \$\boldsymbol{\tau}_{FC}\$ に静力学的に干渉しない成分のみを取り出している。

すなわち、式 (12) で FCA に足部制御 \$\boldsymbol{\tau}_{FC}\$ を行ない、式 (13) で LCA への脚部制御 \$\boldsymbol{\tau}_{LC}\$ を、足部制御に干渉しない範囲で可能な限り実現する、というハイブリッド化が可能となった。

3.2 オートバランス機能の付加

FCA の足部制御 τ_{FC} としてオートバランス機能を付加する。まず、

$$\tau_{FC} = \begin{bmatrix} \tau_{aFC} & \tau_{bFC} \end{bmatrix}^T \in \mathbb{R}^{2n_{FC}} \quad (14)$$

として、単脚支持期における伊藤らの手法 [11] を拡張し、次のようなオートバランス制御則を適用する。

$$\begin{aligned} \tau_{aFC} = & K_{aP} (q_{a3d} - q_{a3}) - K_{aD} \dot{q}_{a3} \\ & + K_{aF} \int \tau_{aGR} dt \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \tau_{bFC} = & K_{bP} (q_{b3d} - q_{b3}) - K_{bD} \dot{q}_{b3} \\ & + K_{bF} \int \tau_{bGR} dt \end{aligned} \quad (16)$$

ただし K_{aP} , K_{aD} , K_{aF} , K_{bP} , K_{bD} , K_{bF} はオートバランス制御ゲイン, q_{a3d} , q_{b3d} は FCA それぞれの目標変位, τ_{aGR} , τ_{bGR} は Fig.1 に示すような各足で定める床反力代表点 p_{aF} , p_{bF} まわりの床反トルクである。この床反トルクは、ロボットの足が地面に対して反作用として及ぼすトルクとしている。

先のハイブリッド化によって各足のオートバランスは静力学的には互いに独立となっている。FCA に干渉する LCA の挙動が準静的で、動力学的効果が無視できると仮定すれば、各足のオートバランスは単脚支持期における伊藤らの手法 [11] と近似的に同等であると見なせる。つまり、伊藤らの手法 [11] において単脚支持期で実現されたような、事前知識を持たない未知のロボットダイナミクス、未知の一定外力下におけるオートバランスが、両脚支持期へ拡張されたことになる。

3.3 パワーアシスト機能の付加

LCA の脚部制御 τ_{LC} としてパワーアシスト機能を付加する。次のようなパワー増幅制御則 [15] が適用できる。

$$\tau_{LC} = J_{LC}^T K_{amp} f_{op} \quad (17)$$

となる。ただし J_{LC} はヤコビ行列, K_{amp} はパワー増幅率の対角行列, f_{op} は操作者が発揮する操作力とした。

先のハイブリッド化によって、この脚部のパワーアシスト制御は τ_{aFC} と τ_{bFC} のオートバランス制御とは静力学的に独立である。しかし、操作者が準静的と見なせない制御指令を入力した場合には、ダイナミクスを介して脚部制御が足部制御に影響する。したがって、操作次第ではオートバランスが達成されなくなる可能性もある。

しかし、操作者のスキル次第では、オートバランス機能を上手く利用しつつ適切な歩容計画を行なうことが可能であると期待される。

4. 考察

提案手法においては、各足部それぞれのオートバランスと脚部のパワーアシストは、静力学的にはすべて互いに独立にハイブリッド化されている。歩容計画とバランス維持の両立は、先の文献 [4] や [12] でも行なわれているが、提案手法は人間の操作者の介入を前提としている点で従来手法とは異なる。

4.1 必要な事前知識

必要な事前知識としては、パワーアシスト等の脚部制御に必要な事前知識がなければ、式 (13) の J_{FL} に関係するパラメータ、つまり二足歩行ロボットの幾何学的情報のみでよい。

4.2 フィードバック

実時間でフィードバックする情報は、各関節の変位および速度情報、オートバランスのための床反トルク情報のみである。外界の情報は床反トルクに集約されており、他の外界センサを必要としない。絶対座標系から見た二足歩行ロボットの位置姿勢情報も不要である。ロボットが足以外から外力を受ける場合にも、外力の影響は床反トルクに反映されているため、外力を陽に知る必要はない。

さらに、式 (15), (16) のオートバランスには特筆すべき点がある。脚 a のオートバランスには脚 a の足部の関節変位・速度と床反トルクが、脚 b には脚 b の関節変位・速度と床反トルクが、それぞれ用いられている。つまり、各足部のオートバランスのためのフィードバックループが、各足部内でローカルに完結しているのである。

したがって、両脚支持期においても両脚を統合するような CoP を考慮する必要はなく、未知の不整地において両足が同一平面上になくても単脚支持期と同様に各足部が自身の情報だけを見てオートバランスすることが可能である。

4.3 提案手法の限界

しかしながら、提案手法は足部・脚部制御を静力学的に非干渉化するのみであり、動力学的には現在のところ何も保証しない。二足歩行を直接実現する技術ではなく、人間によって操作される二足歩行ロボットにオートバランス機能を付加することで、人間が扱う道具としての二足歩行ロボットを、より扱いやすくする技術に過ぎない。

また、ロボットの特性によっては式 (13) で非干渉化されない場合もある。例えば、関節の摩擦トルクが無視できない場合である。この場合、何らかの摩擦補償を行わなければ非干渉化はできない。すなわち、提案手法をそのまま適用するためには、すべての関節の摩擦が十分小さく、滑らかなバックドライバビリティを持つことが要求される。

5. おわりに

上記のように限界はあるものの、提案手法によれば二足歩行ロボットの両脚支持期において、幾何学的情報以外の事前知識を一切必要とせず、フィードバック情報として関節変位・速度と床反トルクのみを必要とする、未知の不整地における従来にないオートバランスを実現することが可能である。

現在、動力学的挙動について解析的にアプローチするのは困難であるが、数値解析においては、ほとんどの場合、安定に平衡状態に収束することが確認されている。

さらに、脚部パワーアシストとのハイブリッド化により、操作者が自らのスキルで足部オートバランスを利用しつつ（あるいは意図的に利用せずに）柔軟かつ

臨機応変な歩容計画を行なうことで、未知の不整地における頑健な二足歩行の実現が期待される。

今後は、解析的考察を深めるとともに実機による実証が不可欠である。

本研究および特許出願 [16] は、2008 年度文部科学省知的クラスター創成事業岐阜・大垣地域ロボティック先端医療クラスターの支援を受けた。ここに感謝の意を表す。

参考文献

- [1] F.B. Horak and L.M. Nashner, "Central Programming of Postural Movements: Adaptation to Altered Support-Surface Configurations," J. of Neurophysiology, 55, 6, pp.1369-1381, 1986.
- [2] 古荘, 山田, "角運動量を考慮した 2 足歩行ロボットの動的制御: 両脚支持期に蹴りを行う歩行", 計測自動制御学会論文集, 22, 4, pp.451-458, 1986.
- [3] 佐野, 古荘, "角運動量制御による 2 足歩行ロボットの 3 次元動歩行", 計測自動制御学会論文集, 26, 4, pp.459-466, 1990.
- [4] 佐野, 古荘, 伊神, "両脚支持期における 2 足歩行システムのトルク配分制御", 計測自動制御学会論文集, 26, 9, pp.1066-1073, 1990.
- [5] 佐野, "重力場を巧みに利用した動的 2 足歩行: 人間に近い歩行への挑戦", 日本ロボット学会誌, 11, 3, pp.354-359, 1993.
- [6] 水戸部, 矢島, 那須, "ゼロモーメント点の操作による歩行ロボットの制御", 日本ロボット学会誌, 18, 3, pp.359-365, 2000.
- [7] 水戸部, 益山, 柴田, 山野, 那須, "歩行ロボットの床圧・摩擦力に基づく ZMP 操作および角運動量制御への応用", 日本ロボット学会誌, 20, 5, pp.515-520, 2002.
- [8] 伊藤, 川崎, "床反力に基づく一脚リンク系の姿勢制御", 第 38 回 計測自動制御学会学術講演会予稿集, 106 D-5, 2000.
- [9] S. Ito and H. Kawasaki, "A Standing Posture Control Based on Ground Reaction Force," Proc. of the 2000 IEEE/RSJ Intl. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.1340-1345, 2000.
- [10] 発明者: 伊藤, 川崎, 出願人: 岐阜大学, "脚を有する機械の姿勢制御装置及び制御方法", 特許第 363738 号, 出願日 2001 年 9 月 7 日.
- [11] 伊藤, 西垣, 川崎, "床反力に基づいた一定外力場での起立姿勢に対する制御法", 計測自動制御学会論文集, 38, 1, pp.79-86, 2002.
- [12] 伊藤, 浅野, 川崎, "床反力中心制御による 2 足歩行系両脚支持期の重心移動", 日本ロボット学会誌, 22, 4, pp.535-542, 2004.
- [13] 古田, 天野, 伊藤, 佐々木, "CoP の軌道追従による足踏み運動制御", 第 8 回 計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会講演論文集, pp.817-818, 2007.
- [14] M.H. Raibert and J.J. Craig, "Hybrid Position/Force Control of Manipulators," Trans. ASME J. Dyn. Syst. Meas. Cont., 102, pp.126-133, 1981.
- [15] 金岡, "パワー増幅ロボットシステム設計概論: 力学的相互作用にもとづく人と機械の相乗効果を実現するために", 日本ロボット学会誌, 26, 3, pp.255-258, 2008.
- [16] 発明者: 金岡, 出願人: 学校法人立命館, "多脚歩行式移動装置のハイブリッド制御装置及び手法", 特願 2009-063461, 出願日 2009 年 3 月 16 日.